



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

Fundada en 1867



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES BIOFÍSICAS CON  
PARÁMETROS DE MODELOS HIDROLÓGICOS CONCEPTUALES  
EN LA MICRO-CUENCA ALTO-ANDINA DEL RÍO ZHURUCAY.**

Tesis previa a la obtención  
del Título de Ingeniera  
Ambiental.

**AUTORA:**

María Augusta Marín Sarmiento

**DIRECTOR:**

Ing. Patricio Javier Crespo Sánchez, Ph.D.

***Cuenca - Ecuador***

***2015***



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## RESUMEN

En los ecosistemas alto-andinos, como el páramo húmedo, el monitoreo y la falta de estudios son una problemática, que se ve agravada debido a la creciente necesidad de utilizar datos de caudales generados en estos ecosistemas para llevar a cabo estudios acerca de problemas medio ambientales. De esta manera se busca metodologías para obtener estos datos mediante estimaciones a través de relaciones entre modelación hidrológica y las propiedades de la cuenca. En este estudio se analizó el beneficio de las propiedades biofísicas para estimar los parámetros de dos modelos conceptuales, debido a que la obtención de estos es un obstáculo para la aplicación de modelos de lluvia-escurrimiento. Los modelos fueron calibrados para la cuenca alta del Río Zhurucay, en los páramos de Quimsacocha, para obtener un conjunto de parámetros que describen el comportamiento hidrológico, los cuales se utilizaron para realizar las correlaciones con las propiedades biofísicas y posteriormente se obtuvo las ecuaciones de regresión, que serán útiles para estimar los parámetros en cuencas no monitoreadas. Para la evaluación del desempeño de los modelos se usaron varios criterios de eficiencia como el índice de Nash and Sutcliffe, BIAS, y bandas de incertidumbre generadas mediante GLUE. Los resultados obtenidos muestran que los modelos utilizados son una buena representación del sistema. Mientras que en el análisis de correlaciones, la mayoría de los parámetros reflejan una relación significativa con varias de las propiedades biofísicas, de esta manera se obtuvieron las ecuaciones de ajuste para cada parámetro.

**Palabras claves:** modelación hidrológica, propiedades biofísicas, Páramo alto-andino, análisis de incertidumbre (GLUE).



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## Abstract

In the high-Andean ecosystems such as the wet moor, monitoring and lack of education are a problem, which is aggravated due to the increasing need for data flow generated by these ecosystems to conduct studies on means problems environmental. Thus methodologies for obtaining this information are sought by estimates through relationships between hydrological modeling and watershed properties. In this study the benefit of the biophysical properties to estimate the parameters of two conceptual models, because obtaining these is an obstacle to the application of rainfall-runoff models was analyzed (Xu, 2000). The models were calibrated for River basin Zhurucay, on the moors of Quimsacocha, for a set of parameters describing the hydrological behavior, which are used to make correlations with the biophysical properties and then the regression equations obtained that will be useful to estimate the parameters in unmonitored basins. For the evaluation of the performance of various models of efficiency criteria as the index of Nash and Sutcliffe, BIAS and bands of uncertainty generated by GLUE used. The results show that the models used are a good representation of the system. While in the correlation analysis, the most significant parameters concerning reflect several biophysical properties, thus setting equations were obtained for each parameter.

**Key words:** hydrologic modeling, biophysical properties, high-Andean Páramo, uncertainty analysis (GLUE)



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	2
Abstract	3
CAPITULO N° 1	12
1.1 INTRODUCCION	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo general	13
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 REVISION BIBLIOGRAFICA	14
1.3.1 Páramo	14
1.3.2 Cuenca Hidrológica	15
1.3.3 Ciclo hidrológico	16
1.3.4 Propiedades Biofísicas	16
1.3.5 Modelación	17
1.3.6 Metodología GLUE	18
CAPITULO N° 2	19
MATERIALES Y EQUIPOS	19
2.1 Área de estudio	19
2.2 Monitoreo y disponibilidad de datos	21
CAPITULO N° 3	23
3.1 METODOLOGÍA	23
3.1.1 Descripción de los modelos conceptuales	23
3.1.1.1 Estructura tres reservorios en serie (3RSa)	24
3.1.1.2 Estructura dos reservorios en paralelo (2Rp)	24
3.2 Ecuaciones utilizadas en los modelos	25
3.2.1 Estimación de la evapotranspiración.	26
3.2.2 Estimación del flujo lateral	27
3.2.3 Estimación de la percolación	27
3.2.4 Flujo por exceso de saturación	27
3.3 Optimización de Parámetros	27
3.3.1 Eficiencias de los modelos	29
3.3.1.1 Coeficiente de Nash-Sutcliffe	29



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

3.3.1.2	Sesgo Relativo BIAS	29
3.3.1.3	Coeficiente de Nash-Sutcliffe modificado	30
3.3.1.4	Precisión (AC%)	30
3.3.1.5	Bandas de Incertidumbre	30
3.4	Medidas de evaluación de los modelos conceptuales	31
3.5	Relaciones entre las propiedades biofísicas y los conjuntos de parámetros	31
3.5.1	Correlaciones múltiples	31
3.5.2	Regresiones lineales múltiples	32
CAPITULO N° 4		34
RESULTADOS		34
4.1	Calibración y evaluación de los modelos.	34
4.2	Parámetros óptimos de los modelos	38
4.3	Obtención de las Ecuaciones de regresión	40
DISCUSIONES Y CONCLUSIONES		44
RECOMENDACIONES		46
BIBLIOGRAFÍA		47



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Principales propiedades biofísicas de las micro-cuencas del río Zhurucay-----	20
<b>Tabla 2.</b> Descripción de los parámetros de los modelos conceptuales. -----	28
<b>Tabla 3.</b> Indicadores del rendimiento de los modelos para el periodo de calibración y validación para cada micro-cuenca. -----	34
<b>Tabla 4.</b> Parámetros óptimos del modelo 2Rp-----	38
<b>Tabla 5.</b> Parámetros óptimos del modelo 3RSa. -----	39
<b>Tabla 6.</b> Parámetros del modelo 2RP y sus valores de correlación (r). (Predictores) -----	41
<b>Tabla 7.</b> Parámetros del modelo 3RSa y sus valores de correlación (r). (Predictores) -----	41
<b>Tabla 8.</b> Ecuaciones de regresión de los parámetros del modelo 2Rp.-----	42
<b>Tabla 9.</b> Ecuaciones de regresión de los parámetros del modelo 3RSa.-----	42



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 1</b> Área de estudio - Cuenca del río Zhurucay Fuente: Patricio Lazo .....	20
<b>Fig. 2</b> fotografía del Andosol e Histosoll Foto: Pablo Borja .....	21
<b>Fig. 3</b> Estructura 3RSa Fuente: Albuja & Tenelanda .....	24
<b>Fig. 4</b> Estructura 2RP Fuente: Albuja & Tenelanda .....	25
<b>Fig. 5</b> Descarga observada, descarga simulada del modelo 1 y descarga simulada del modelo 2 de la micro-cuenca 9 en el periodo de calibración. ....	35
<b>Fig. 6</b> Descarga observada, descarga simulada del modelo 1 y descarga simulada del modelo 2 de la micro-cuenca 9 en el periodo de validación.....	36
<b>Fig. 7</b> Descarga observada y límites de incertidumbre del 5 y 95% de la descarga simulada de la micro-cuenca 9 en el periodo de calibración.....	37



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## CLÁUSULA DE DERECHO DE AUTOR



Universidad de Cuenca  
Cláusula de derechos de autor

Yo, María Augusta Marín Sarmiento, autora de la tesis "RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES BIOFÍSICAS CON PARÁMETROS DE MODELOS HIDROLÓGICOS CONCEPTUALES EN LA MICRO-CUENCA ALTO-ANDINA DEL RÍO ZHURUCAY", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, Junio 2015

María Augusta Marín Sarmiento

C.I: 0105392286





# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL



Universidad de Cuenca  
Cláusula de propiedad intelectual

---

Yo, María Augusta Marín Sarmiento, autora de la tesis **"RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES BIOFÍSICAS CON PARÁMETROS DE MODELOS HIDROLÓGICOS CONCEPTUALES EN LA MICRO-CUENCA ALTO-ANDINA DEL RÍO ZHURUCAY"**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, Junio 2015

María Augusta Marín Sarmiento

C.I: 0105392286



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

El presente estudio se ha realizado dentro del **Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales iDRHiCA de la Universidad de Cuenca.**

Las bases de datos hidrometeorológicos utilizados en la investigación son de propiedad de la Universidad de Cuenca, iDRHiCA su uso y publicación externa al presente trabajo están sujetos a las leyes de propiedad intelectual vigentes.

Cuenca, mayo 2015.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## AGRADECIMIENTO

He de reconocer la gran labor de quienes hicieron posible este proyecto, principalmente a mi director de tesis, Ingeniero Patricio Crespo, persona que me ha brindado la oportunidad de aprender de sus conocimientos y experiencia; al Ingeniero Daniel Tenelanda y a la Ingeniera Alicia Correa por sus aportes y continuas sugerencias.

A la Universidad de Cuenca con su Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHiCA) y al Área Nacional de Recreación Quimsacocha.

A mis padres y hermano, amigos y compañeros por su cariño y apoyo incondicional.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

María Augusta Marín Sarmiento.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## CAPITULO N° 1

### 1.1 INTRODUCCION

Los páramos húmedos Alto-Andinos son la principal fuente de agua para ciudades y comunidades localizadas en los Andes además brindan importantes servicios ecosistémicos debido principalmente a la alta capacidad de almacenamiento y regulación de agua (Tocachi, 2014). A pesar de su importancia, la hidrología del páramo ha sido pobremente estudiada, este problema se agrava debido a que existe limitada información de monitoreo (Buytaert & Beven, 2011), mientras que cada vez se incrementa la necesidad de utilizar el caudal generado en cuencas que incluso no cuentan con registros para estudio medio ambientales previos y de aprovechamiento de recursos hídricos. Por tanto es imprescindible utilizar metodologías para obtener estimaciones aceptables de caudal, en orden de asesorar la toma de decisiones además del manejo de estos ecosistemas (Céleri, Crespo, Bièvre, & Acosta, 2011).

Las estimaciones de caudal se requieren como requisito previo para la resolución de una serie de problemas de ingeniería y medio ambiente (Kokkonen, Jakeman, Young, & Koivusalo, 2003). Particularmente dentro de estudios de manejo y gestión de cuencas hidrológicas la obtención de series de caudal son prioritarias, teniendo un enfoque hacia la conservación de ecosistemas. En cuencas que no disponen de registros hidrológicos, como caudales, técnicas de regionalización pueden aplicarse para obtener tales estimaciones, esta regionalización puede ser definida como la transferencia de información de una cuenca monitoreada a otra sin monitoreo (Bloschl & Sivapalan, 1995).

Una metodología comúnmente utilizada para generar caudales en cuencas sin registros de caudal hace uso de información básica del área de estudio como las propiedades biofísicas para obtener los parámetros de un determinado modelo hidrológico, utilizando relaciones entre los parámetros de modelos hidrológicos y las propiedades biofísicas de cuencas con características similares (Post & Jakeman, 1999), (Sánchez & Vélez, 2003), conociendo que el principal problema de los modelos conceptuales hidrológicos está relacionado con la obtención de los parámetro en cuencas no monitoreadas (Xu, 2000).

Los valores paramétricos de modelos conceptuales hidrológicos no pueden derivarse directamente de características de la cuenca, en consecuencia, métodos empíricos de regresión se han utilizado para relacionar los parámetros de modelos con las propiedades de la cuenca (Kim & Lee, 2013), (Xu, 2000). Estas relaciones se han investigado en regiones similares y han dado un gran número de nuevos conocimientos. De esta manera, la hidrología se puede asociar con las distintas



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

propiedades biofísicas de la zona mediante modelado hidrológico (Mosquera et al. 2015).

La modelación hidrológica se presenta como una estrategia importante para la hidrología, como una técnica para producir una serie de eventos, su uso no es solo para obtener resultados de interés para la toma de decisiones acerca de la ocupación del territorio, del aprovechamiento y conservación de sus recursos naturales, sí no también para la generación de conocimiento mediante la construcción de modelos conceptuales (Vélez Upegui, 2013), (Sanchez, 1974).

Los modelos conceptuales son herramientas útiles para predecir corrientes de flujo utilizando los parámetros de los modelos que definen algunas características hidrológica de las cuencas en estudio (Kim & Lee, 2013). Además los modelos son importantes al momento de asesorar sobre varios aspectos hidrológicos que pueden ayudar en la solución de problemas medio ambientales. Con frecuencia son utilizados para la generación de series de caudal, planeación y manejo de recursos hídricos así como pronóstico de caudales.

A más de los análisis estadísticos para series de caudal, se han llevado a cabo pocos estudios hidrológicos en especial de modelación numérica que sean relacionados con las propiedades biofísicas de una cuenca dentro de paramo Alto-Andino del Ecuador para la predicción del caudal de las cuencas no monitoreadas, siendo este uno de los retos principales en la hidrología (Crespo et al., 2011)

En este sentido el presente estudio se direccionó a la calibración y validación de 8 sub-cuencas de paramo Alto-andino para obtener los sets o conjuntos de parámetros óptimos, y posteriormente determinar la relación que guardan con respecto a los parámetros biofísicos correspondientes para obtener ecuaciones de regresión que permitan derivar los parámetros para su aplicación en un modelo conceptual hidrológico en cuencas no monitoreadas de características similares.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo general

Relacionar las propiedades biofísicas de una cuenca alto-andina con los parámetros calibrados de dos modelos hidrológicos conceptuales de lluvia-escurrentía en la Cuenca Alto-andina del río Zhurucay.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## 1.2.2 Objetivos específicos

- Calibrar y validar dos modelos hidrológicos conceptuales.
- Determinar la relación entre las propiedades biofísicas de las sub-cuencas y los conjuntos de parámetros optimizados.

## 1.3 REVISION BIBLIOGRAFICA

### 1.3.1 Páramo

En los Andes Ecuatorianos, las zonas montañosas suministran gran parte del agua que se distribuye para múltiples usos, incluso importantes servicios ambientales. El Páramo posee una especial relación con el agua, es un almacenador y regulador de la misma. Además posee una única relación con el carbono pues retiene el carbono en sus suelos que son ricos en materia orgánica (Borja, Iñiguez, Crespo, Cisneros, & Cisneros, 2008), (Soto-w et al., 2012).

En el Ecuador el páramo cubre alrededor de 1.250.000ha; son parte de una biodiversidad de ecosistemas que se presenta en el Ecuador por 3 factores esenciales: la situación ecuatorial, presencia de la cordillera de los Andes y otras sierras menores (Vásconez & Hofstede, 2006). Este ecosistema presenta características biofísicas y socioeconómicas exclusivas. Su biodiversidad a nivel de especies y ecosistema es considerablemente alta, con plantas y animales que muestran adaptaciones especiales (Ortiz, Chiriboga, & Martínez, 2008).

Una característica primordial del paramo es la elevada irradiación ultravioleta, la capa de la atmosfera actúa como filtro de los rayos que pueden ser dañinos para la piel. Sin embargo a pesar de su irradiación no logra mantener el calor del sol y escapa al espacio (Vázconez, 2010).

En cuanto a la vegetación del páramo es importante mencionar que decir la vegetación herbácea y almohadilla nos sirve como reguladores hídricos dentro del Páramo, de esta manera se pueden encontrar principalmente en lugares drenados y humedales (Obrocki, Goerres, & Kaslin, 2012).

El pajonal en sus especies es muy variable pero los géneros presentes son: Calamagrostis (especialmente C. coarctata), Festuca, Paspalum, y algunas Cyperaceae como Carex.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Mientras en la vegetación de almohadillas hay varias especies por ejemplo: *Azorella pedunculata* (Apiaceae), *Plantago rigida* (Plantaginaceae) y *Distichia muscoides* (Juncaceae), entre otras (Josse, Mena, & Medina, 2000).

## 1.3.2 Cuenca Hidrológica

Una cuenca hidrológica es un conjunto de sistemas de cursos de agua que drenan a un punto en común, los cuales son definidos por el relieve; las divisoras de aguas se definen naturalmente y corresponden a las partes más altas del área que encierra un río, es una línea imaginaria que limita la cuenca hidrológica y marca el límite entre unas cuencas hidrológicas y las cuencas vecinas (Fernandez & Gonzalo, 2012), (Adopt-a-stream, 2003).

La importancia de una cuenca hidrológica se fundamenta en que son un soporte necesario para una variedad de recursos, para brindar un hábitat a plantas y animales, y proporcionar agua potable para la gente, sus cultivos, animales e industrias. La protección de los recursos naturales en las cuencas es esencial para mantener la salud y el bienestar de todos los seres vivos (Fernandez & Gonzalo, 2012).

La cuenca funciona como un todo, si bien tiene componentes, estos de forma separada no son funcionales. Se distingue una cuenca en tres sectores: alto, medio y bajo. La cuenca cumple diversas funciones, tales como en la Hidrológica

- a) Captación de agua de las diferentes fuentes para formar manantiales, ríos y arroyos.
- b) Almacenamiento del agua en sus diferentes formas y tiempos de duración.
- c) Descarga del agua como escurrimiento.

Como subsistema biofísico la cuenca está constituida por una oferta ambiental en un área delimitada por la divisoria de aguas y con características específicas de clima, componentes geológicos, suelos, red hidrográfica, bosques, usos del suelo, etc. En este sistema abierto consta de influencias y dependencias entre y hacia los elementos de los subsistemas, lo cual se revela en una dinámica de comportamiento que es compleja y que obliga a analizarla en forma integral. Es importante y necesario obtener un conocimiento básico como unidad de gestión a una cuenca hidrológica para realizar un diagnóstico y caracterización del recurso (Ordoñez, 2011a), (García, 2011).



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## 1.3.3 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se considera fundamental de la Hidrología, se refiere al movimiento general del agua, ascendente por evaporación como descendente por las precipitaciones de la misma manera de forma de escorrentía superficial y subterránea (S.C, Escolero, Dominguez, & Edda, 2003). El ciclo hidrológico está influenciado por dos causas, la primera por la energía solar y la segunda por la gravedad. El almacenamiento del agua puede darse en varios reservorios como la atmósfera, océanos, lagos, ríos, suelos, glaciares, campos de nieve y aguas subterráneas (Ordoñez, 2011b).

Ciclo hidrológico es normalmente estudiado con mayor interés en la fase terrestre, donde un elemento fundamental del análisis es la cuenca hidrográfica. Una cuenca hidrográfica es un área de captación natural del agua de la precipitación que converge hacia un único punto de salida. Se compone básicamente de un conjunto de superficies vertientes y de una red de drenaje formada por cursos de agua que fluyen hasta llegar a un lecho único (Adopt-a-stream, 2003).

Todas las actividades desarrolladas por el hombre están relacionadas por el ciclo del agua. Un manejo que promueva buenas prácticas agrícolas en toda la micro-cuenca, incrementará la estabilidad y productividad de la misma y mejorara la regularidad del flujo de los cursos de agua durante el año, ayudando a reducir las fuertes alzas de caudal (Bahamondes & Gaete, 2000), (Ordoñez, 2011b).

## 1.3.4 Propiedades Biofísicas

Las características biofísicas dentro de una cuenca hidrográfica son importantes desde el punto de vista hidrológico debido a que constituyen los factores que afectan en el escurrimiento. Estos factores son la naturaleza del suelo, cobertura vegetal y las características morfométricas (Maderey, 1998).

Las características físicas y morfométricas más utilizadas y estudiadas de una cuenca son:

- Área de la cuenca
- Sistema de drenaje
- Pendiente
- Tipo de vegetación
- Perímetro
- Altitud
- Uso de suelos
- Pendiente





# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

- Longitud de cauce
- Ancho de la red hídrica
- Longitud del cauce principal

Las propiedades biofísicas brindan una útil descripción que permite realizar comparaciones entre diferentes cuencas hidrográficas, de la misma manera proporcionan terminaciones preliminares sobre las características ambientales del área (Gaspari, Rodriguez, & Senisterra, 2012).

Modificaciones en las propiedades biofísicas alteran el comportamiento de la red hidrológica, principalmente en la respuesta del caudal; además estas modificaciones pueden afectar el incremento o disminución del volumen de flujo y la velocidad de su movimiento o repuesta hídrica (Viramontes et al., 2007).

## 1.3.5 Modelación

Un modelo hidrológico es una herramienta útil para mejorar la comprensión de los procesos hidrológicos e incluso describir los componentes predominantes de un sistema complejo, de esta manera un modelo pretende representar la realidad en una estructura de una manera más sencilla (Wagener, 2003). El mejor modelo será el que logra mayor acuerdo en los resultados del modelo con las observadas del real.

Los modelos hidrológicos pueden clasificarse en dos categorías: modelos físicos y modelos matemáticos (Vásquez, 2010). En la práctica, puede distinguirse 4 tipos generales de modelos:

- \* **Determinísticos:** siguen las leyes de la física y/o procesos químicos representados por ecuaciones diferenciales.
- \* **Probabilísticos:** se formulan siguiendo las leyes de probabilidad y azar.
- \* **Conceptuales:** simplificaciones de los procesos físicos, usualmente son descripciones matemáticas que simulan procesos complejos en una estructura determinada.
- \* **Paramétricos:** o conocidos como empíricos, son los más simples que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos. (Weber, Dasso, & Jorquera, 2010).



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

En Modelación Hidrológica es necesaria una etapa denominada calibración la cual se utiliza con la finalidad de ampliar la falta de conocimiento de las heterogeneidades espaciales y de las propiedades de la zona en estudio y así suplir la falta de entendimiento de los actuales procesos y sus interacciones. (McDonell, y col, 2007), de esta manera la etapa de calibración consiste en correr el modelo hidrológico repetidas veces hasta conseguir el conjunto de parámetros óptimos, además incluye la comparación de las medidas estadísticas o funciones objetivo que permiten evaluar el rendimiento de la predicción con el conjunto óptimo de parámetros, cuanto mejor sea la respuesta de las medidas estadísticas mejor será la predicción de caudales (Cambio-Global, Católica-de-Chile, & U.Cuenca, 2009), además es necesaria una etapa de validación en la cual se rige a evaluar los resultados del modelo calibrado, es decir, cuando el modelo simula el caudal se obtiene el rendimiento del mismo (Vaze, J., Jordan, P., Beecham & Frost, S., Summerell, 2012).

En la predicción de caudales se puede encontrar una propagación de la incertidumbre que dependerá de las condiciones iniciales que se muestra tanto en la estructura del modelo, en las variables asumidas y en la calidad de los datos que se van a ingresar. Un control cuidadoso del comportamiento del sesgo de inicialización debe ser parte de las buenas prácticas del modelado (Mazzilli, Guinot, & Jourde, 2012), (Wooldridge, Kalma, & Kuczera, 2001).

## 1.3.6 Metodología GLUE

El supuesto básico de esta metodología establece que, para una serie de datos dada, un modelo único de mejor ajuste no existe, de esta manera, se toman en cuenta los varios conjuntos de parámetros que brindan simulaciones “aceptables”(Beven & Binley, 1992). Esta metodología sirve para determinar sensibilidades de los parámetros y estimar límites de predicción.

La metodología GLUE sujeta el término de probabilidad como una medida del rendimiento para diferenciar que tan posible el modelo genere resultados que representen adecuadamente el comportamiento del sistema del área de estudio (Vargas & Monroy, 2011).

La metodología está basada en simulación Monte-Carlo para la evaluación de la capacidad predictiva del modelo, esta metodología ha sido aplicada a una variedad de problemas ambientales. Su popularidad se debe a la simpleza del método cuando se utiliza en aplicaciones prácticas.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## CAPITULO N° 2

### MATERIALES Y EQUIPOS

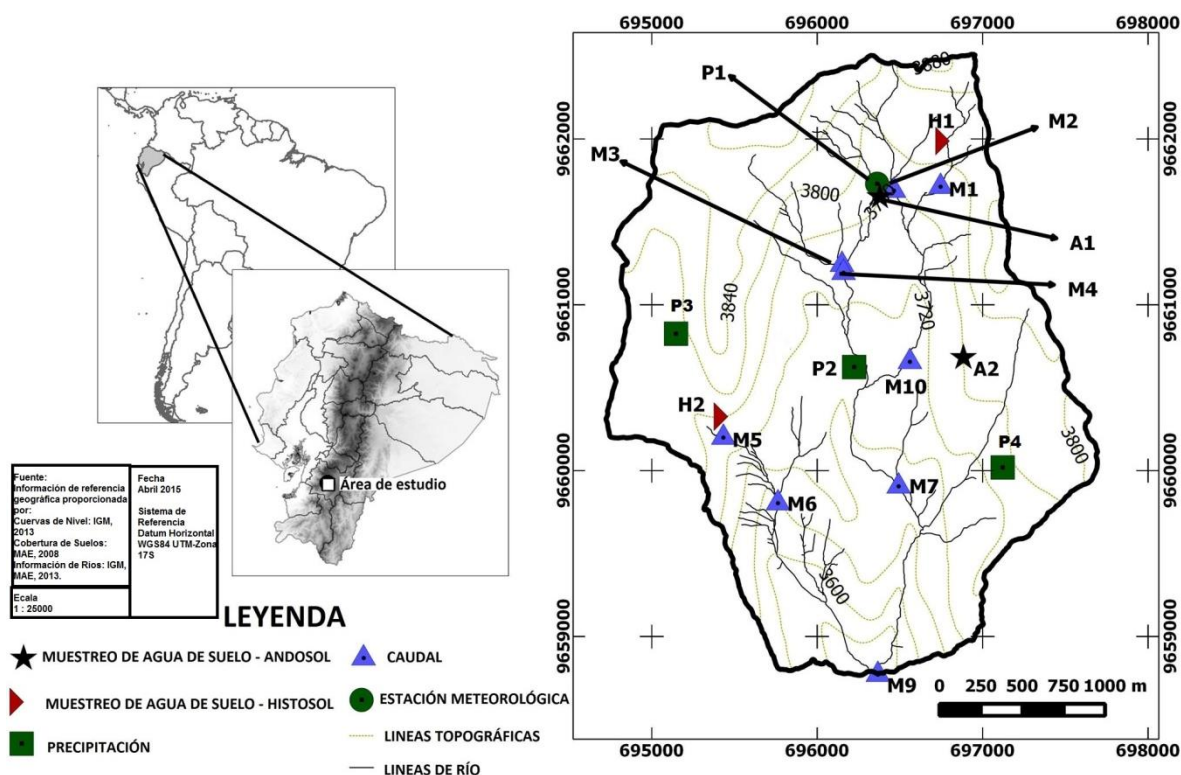
#### 2.1 Área de estudio

El área de estudio es la cuenca del Río Zhurucay, ubicada al Sur del Ecuador a 85 km al sureste de la ciudad de Cuenca, en los páramos de Quimsacocha. El río Zhurucay es efluente del Rircay, el mismo aporta al río Jubones y cuyas aguas desemboca en el océano Pacífico (Padrón, 2013).

Su rango altitudinal entre los 3400 y 3900 m s.n.m. (Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo, 2012), con una área de 7,53 km<sup>2</sup>. Se encuentra entre las parroquias San Gerardo y Chumblín pertenecientes a los cantones de Girón y San Fernando de la provincia del Azuay. Sus coordenadas UTM 694723m. – 697695 m. (X) y 9662507m. – 9658765m. (Y).

El área de estudio se compone de ocho micro-cuenca anidados, que varían en tamaño desde 0,20 km<sup>2</sup> a 7,53 km<sup>2</sup> (ver Fig1.) Las propiedades biofísicas de las micro-cuencas utilizadas en este estudio se describen en la tabla 1.

La temperatura de la cuenca puede llegar a valores inferiores a 1°C y superar los 15°C, la humedad relativa varía entre el 82 y el 91% (Mosquera et al., 2012),(Padrón, 2013). La precipitación anual registrada desde 1964 hasta 2008 oscila entre los 900 y 1600 mm. La precipitación promedio anual en estos ecosistemas es muy variable, puede variar entre 700-4000 mm. Mucho tiene que ver en estas variaciones el efecto latitudinal con sus correspondientes corrientes oceánicas (Buytaert, Celleri, Willems, Bièvre, & Wyseure, 2006).



**Tabla 1.** Principales propiedades biofísicas de las micro-cuencas del río Zhurucay

M	A	Alt.Avg	P	Ds.d	TWI	S.AN	S.HS	VC.TG	VC.CP	G.Qm	G.Tu
1	0.21	3840	14	6.71	9.63	85	13	85	15	100	0
2	0.38	3840	24	6.92	12.75	83	15	87	13	66	1
3	0.38	3800	19	4.77	9.40	80	16	78	18	59	41
4	0.65	3800	18	6.76	12.46	76	20	79	18	50	48
5	1.22	3820	10	0.33	10.00	37	59	37	63	100	0
7	3.28	3780	18	4.21	8.23	74	22	73	24	50	30
9	7.53	3700	17	3.26	16.72	72	24	71	24	56	31
10	1.40	3800	20	4.49	11.77	78	20	78	17	70	1

**Leyenda:** M, micro-cuenca; A, Área de cada micro-cuenca (km<sup>2</sup>); Alt.Avg, altura promedio (m a.s.l); P, Pendiente promedio(%); Ds.d, densidad de drenaje (km/km<sup>2</sup>); TWI, índice topográfico; S.AN, suelo Andosol(%), S.HS, suelo Histosol(%); VC.TG, cobertura vegetal pajonal(%); VC.CP, cobertura vegetal almohadillas (%); G.Qm, Geología Quimsacocha(%); G.Tu, Geología Turi(%).

La geomorfología de la cuenca es glacial, y el valle formado de esta manera está rodeado por laderas con pendientes, principalmente en el rango de 0% a 20%, pero en algunos tan pronunciada como el 40%. La inclinación de las cuencas varía entre el 14% y el 24%, pero la mayor parte de la superficie de la cuenca (53% a 81%)



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

presenta pendientes entre 0% y 20%. La geología de la cuenca corresponde a depósitos volcánicos compactados por la última actividad glaciaria (Quichimbo et al., 2010). En la zona existen tres formaciones, la de Turi con un 31%, la formación Quimsacocha con un 56% y la formación Santa Isabel con el 13%. (Mosquera et al., 2012). Depósitos cuaternarios se ubican generalmente en las zonas de pendiente fuerte y escarpes que normalmente representan menos del 30% de la superficie total del país. La cobertura vegetal de la cuenca de estudio está dominada principalmente por el pajonal y almohadillas. Los usos de la tierra están limitados al pastoreo extensivo de baja densidad animal y quemadas en la parte baja de la cuenca (Mosquera et al., 2012), (Crespo et al., 2012).

Los suelos más comunes en el páramo de Quimsacocha son los Andosoles e Histosoles alrededor de un 70% y 25% respectivamente, según la clasificación de la FAO. Las características de las zonas montañosas como el clima húmedo-frío y la baja presión atmosférica, favorece la acumulación de la materia orgánica y esto, conjuntamente con la acumulación de cenizas volcánicas y la geomorfología de la zona, son responsables para la formación de suelos negros, húmicos y ácidos (Quichimbo et al., 2010), (Borja et al., 2008).



**Fig. 2** fotografía del Andosol e Histosoll

Foto: Pablo Borja

## 2.2 Monitoreo y disponibilidad de datos

El monitoreo en la cuenca media y alta del río Zhurucay se ha venido realizando por parte del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca (Centro de Hidrología y Clima). Los datos utilizados son proporcionados por el Departamento, estos constan de registros de caudal, evapotranspiración y precipitación de cada sub-cuenca, de estos datos se seleccionó una serie para el periodo de calibración y otra serie para el periodo de validación.



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Las cuencas monitoreadas en el sistema de enfoque anidado en la cuenca Zhurucay difieren en tamaño, desnivel, geología, suelos, vegetación y uso del suelo. Por lo tanto, para este estudio se utilizó la información de las propiedades biofísicas para cada sub-cuenca, los cuales se recogieron datos durante las sesiones de campo y que fueron analizados con la herramienta computacional Sistema de Información Geográfica (ArcGis 10.1) con sus respectivos procedimientos.

Anteriormente se contaba con 10 micro-cuencas, debido a estudios hechos se descartaron algunas de ellas por las cuales se utilizaran en este estudio M1, M2, M3, M4, M5, M7, M9 y M10. Cada una de las ocho micro-cuenca de estudio está dotada de un vertedero compuesto, excepto en el M9 que contiene un vertedero rectangular. Para el monitoreo, cada vertedero cuenta con sensores programados para tomar lecturas de niveles de agua y de presión atmosférica cada 5 minutos, con estos niveles se estima el caudal mediante la ecuación de descarga de Kindsvater-Shen (Guallpa, 2013), los datos fueron transformados a caudales horarios.

La precipitación media de cada sub-cuenca se obtuvo mediante polígonos de Thiessen (Thiessen, 1911) con la información de 4 pluviógrafos de cubeta basculante con resolución de 0.2 mm, marca Onset, los datos utilizados fueron agregados a series horarias. Además mediante datos meteorológicos se calculó la Eto (Evapotranspiración) la cual fue obtenida mediante Penman-Monteith, que describe de mejor manera su comportamiento a nivel global (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006), de igual manera la información recopilada fue transformada a series de 1 hora (Cordova, Carrillo, & Céleri, 2013).





# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## CAPITULO N° 3

### 3.1 METODOLOGÍA

#### 3.1.1 Descripción de los modelos conceptuales

En un estudio anterior realizado por Albuja & Tenelanda, (2014) se desarrollaron diez modelos hidrológicos para interpretar los procesos hidrológicos en la Cuenca del río Zhurucay, de los cuales en este estudio se utilizarán dos modelos, los mismos que presentaron el mejor desempeño.

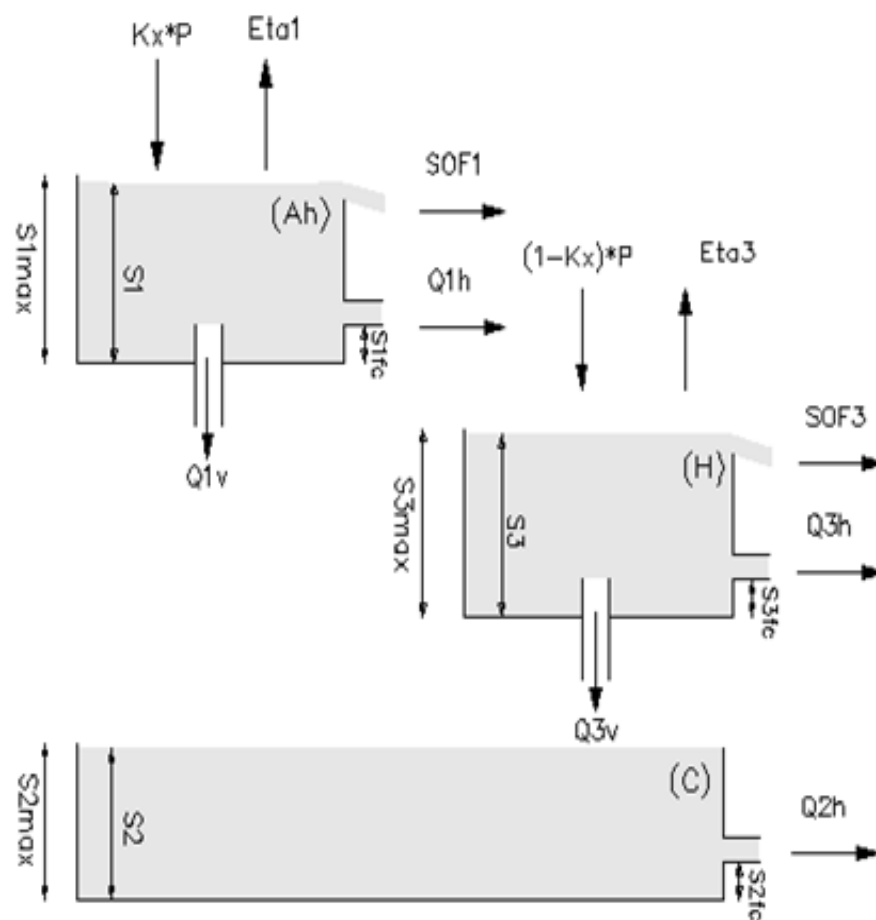
Los modelos conceptuales representan la micro-cuenca como una serie de reservorios de humedad del suelo, donde los procesos hidrológicos fueron simulados mediante funciones matemáticas. Investigaciones realizadas dentro de los páramos indican que señales de recesión, el flujo lateral procedente de capas orgánicas y minerales y las capas orgánicas de Histosol son muy influyentes en la generación de caudales. Mientras que el flujo superficial en los páramos se considera insignificante por la capacidad de infiltración del suelo, características de retención de los mismos y el régimen de lluvias. Además se consideró la posición dentro del paisaje los distintos estratos de suelo para la conceptualización de los procesos influyentes a nivel de sub-superficie (Buytaert & Beven, 2011).

Las distintas hipótesis de funcionamiento junto con las estructuras se justifican mediante los hallazgos realizados por (Crespo, 2012), (Crespo, Bücken, et al., 2011), (Crespo, Feyen, et al., 2011), (Mosquera, Lazo, Cárdenas, Crespo, & Céleri, 2014), (Buytaert & Beven, 2011), (Mosquera et al., 2012), de esta manera se estructuraran los modelos, en las cuales se consideró: la percolación profunda no posee incidencia como pérdida en el flujo generado, y el flujo vertical de los extractos orgánicos superficiales se efectúa hacia el estrato mineral; el horizonte mineral es el que domina en los periodos secos prolongados con la contribución de flujo; el flujo lateral muestra una mayor incidencia en los periodos lluviosos el cual es generado por los horizontes orgánicos; y finalmente el flujo superficial por exceso de saturación del suelo ocurre durante eventos extremos de precipitación.

Para un descripción más detallada acerca del desarrollo y selección de las estructuras conceptuales utilizadas en el presente estudio se recomienda al lector leer el trabajo desarrollado por Albuja & Tenelanda, (2014).

### 3.1.1.1 Estructura tres reservorios en serie (3RSa)

Es un modelo que está representado con dos reservorios en serie que simulan el aporte de los estratos orgánicos de los Andosoles que están ubicados en la ladera hacia la zona de fondo del valle donde se encuentra los Histosoles, y un reservorio en paralelo para el estrato mineral, este último caracterizado por su drenaje deficitario (Fig.3), que por los estratos superiores es recargado por percolación para la generación de flujo lento de periodos secos. Para esta estructura se considera un componente de flujo por exceso de saturación en el reservorio que representa el Andosol e Histosol.



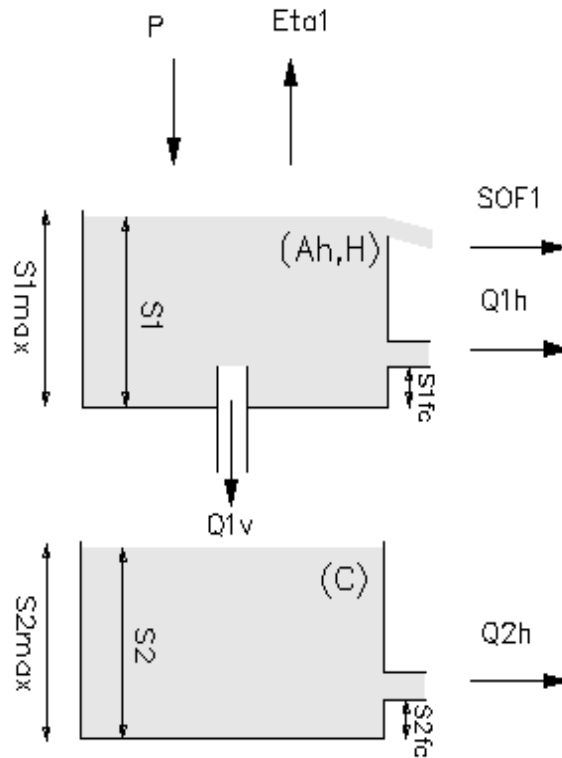
**Fig. 3 Estructura 3RSa**  
Fuente: Albuja & Tenelanda

### 3.1.1.2 Estructura dos reservorios en paralelo (2Rp)

Es un modelo que representa en el reservorio superior los estratos orgánicos del suelo y un reservorio inferior para el extracto mineral donde existe el aporte de flujo,



el cual es recargado por percolación de los estratos orgánicos en periodos húmedos (Fig.4). En el estudio (P. Crespo et al., 2012) se menciona que los Histosoles están saturados gran parte del año lo que expresa una alta capacidad de almacenamiento (Albuja & Tenelanda, 2014).



**Fig. 4 Estructura 2RP**  
Fuente: Albuja & Tenelanda

### 3.2 Ecuaciones utilizadas en los modelos

El Almacenamiento (S) en cada uno de los reservorios de los modelos conceptuales está regido por las siguientes ecuaciones de balance.

**Modelo (3RSa).**

$$S_1(t) = S_1(t - 1) + Kx * P(t) - Eta1(t) - SOF1(t) - Q1h(t) - Q1v(t)$$

$$S_3(t) = S_3(t - 1) + (1 - Kx) * P(t) - Eta3(t) - SOF3(t) + SOF1(t) + Q1h(t) - Q3h(t) - Q3v(t)$$

$$S_2(t) = S_2(t - 1) - Q2h(t) + Q1v(t) + Q3v(t)$$



## Modelo (2RP).

$$S_1(t) = S_1(t - 1) + P(t) - Eta1(t) - SOF1(t) - Q1h(t) - Q1v(t)$$

$$S_2(t) = S_2(t - 1) - Q2h(t) + Q1v(t)$$

En donde  $P$  representa la variable de la precipitación en el intervalo de tiempo  $t$ ,  $Eta$  es la evapotranspiración actual,  $SOF$  es el flujo por exceso de saturación,  $Qh$  es el flujo lateral de cada reservorio,  $Qv$  es el flujo vertical de percolación,  $Kx$  factor de área que representa la cantidad o densidad de suelos orgánicos en la micro-cuenca.

### 3.2.1 Estimación de la evapotranspiración.

( $Eto$ ) se obtiene de la suma entre la transpiración actual ( $Ta$ ) y la evaporación actual ( $Ea$ ).

$$Eto = Ta + Ea$$

La estimación de la transpiración actual, se calcula en función de la  $Etp$  con las siguientes condiciones en función del contenido de agua de los reservorios superficiales, para esto la ecuación utiliza como parámetros el índice de área foliar de la vegetación ( $\omega_o$ ), además de un coeficiente  $D$  adimensional que varía entre 0.45 y 0.55 :

$$\text{Para } S_i(t) \geq S_{ifc} \quad Ta = Etp * [1 - \exp(-C\omega_o)]$$

$$\text{Para } S_{ifc} > S_i(t) > S_{iwp} \quad Ta = Etp * [1 - \exp(-C\omega_o)] \frac{S_i(t) - S_{iwp}}{S_{ifc} - S_{iwp}}$$

$$\text{Para } S_i(t) \leq S_{iwp} \quad Ta = 0$$

La estimación de la evaporación actual ( $Ea$ ) se realiza en función del remanente de la evapotranspiración potencial ( $Etp$ ) y la transpiración actual ( $Ta$ ), mediante las siguientes condiciones de contenido de agua en los reservorios superficiales.

$$\text{Para } S_i(t) \geq S_{imax} \quad Ea = Etp - Ta$$

$$\text{Para } S_i(t) > S_{ifc} \quad Ea = (Etp - Ta) \frac{S_i(t) - S_{ifc}}{S_{imax} - S_{ifc}}$$

$$\text{Para } S_i(t) \leq S_{ifc} \quad Ea = 0$$

En donde  $S(t)$  es el contenido de humedad en la parte superior del estrato en el tiempo  $t$ ,  $S_{max}$  representa el máximo contenido de humedad del estrato superior correspondiente al punto de saturación,  $S_{fc}$  es el contenido de humedad



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

correspondiente a la capacidad de campo, y  $S_{wp}$  es el contenido de humedad correspondiente al punto de marchitez.

## 3.2.2 Estimación del flujo lateral

La ecuación consiste en un parámetro  $a$  multiplicado por el exponencial del producto entre el almacenamiento y un parámetro  $B$ , a ser determinados por calibración.

$$\text{Para } S_i(t) < S_{i\max} \quad Q_i h(t) = a_i * e^{-Bi(S_{i\max} - S_i(t))}$$

$$\text{Para } S_i(t) \geq S_{i\max} \quad Q_i h(t) = a_i$$

$S_{i\max}$ , representa el máximo contenido de humedad en el suelo.

## 3.2.3 Estimación de la percolación

La ecuación cuenta con un parámetro  $k$  que representa el coeficiente de descarga en el periodo de tiempo ( $t$ ), (Angeli, Buma, Gasparetto, & Pasuto, 1998). Para esta ecuación se asume que  $S_{ifc}$  representa el valor de almacenamiento que queda en el reservorio cuando el flujo disminuye a cero.

$$\text{Para } S_i(t) \geq S_{ifc} \quad Q_i v(t) = \frac{(S_i(t) - S_{ifc})}{k_i}$$

$$\text{Para } S_i(t) < S_{ifc} \quad Q_i v(t) = 0$$

## 3.2.4 Flujo por exceso de saturación

El flujo por exceso de saturación SOF se obtiene cuando el reservorio superior excede la capacidad de almacenamiento,  $S_{i\max}$ .

## 3.3 Optimización de Parámetros

El conjunto de parámetros óptimos para cada sub-cuenca se obtiene de la etapa de calibración de los modelos, la cual se usa para adquirir la mejor concordancia entre los flujos simulados y registrados al ejecutar varias corridas del modelo, evaluando las eficiencias obtenidas con cada conjunto de parámetros hasta la obtención del conjunto óptimo. (Vaze, J., Jordan, P., Beecham & Frost, S., Summerell, 2012). Para



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

esto se ingresa los rangos para cada parámetro obtenidos del estudio anterior de (Albuja & Tenelanda, 2014).

Dentro del periodo de calibración se considera un periodo de calentamiento ("warming up") al inicio de la serie, el cual se utiliza para atenuar la influencia de las condiciones iniciales (Tocachi, 2014). Luego de la obtención de los conjuntos óptimos de parámetros en el periodo de calibración, se realiza la validación de los modelos utilizando una serie distinta de datos horarios y cada conjunto de parámetros respectivo a cada micro-cuenca. Para estas etapas se realizó una separación de los datos disponibles, correspondiente al 70% para calibración, desde 10/12/2010 hasta 05/02/2013 y el 30% para validación, desde 05/02/2013 hasta 04/04/2014, en los cuales se evidenció la presencia de un periodo húmedo y un periodo seco.

A continuación se muestra un resumen de los parámetros utilizados en los modelos conceptuales, en la tabla 2.

**Tabla 2.** Descripción de los parámetros de los modelos conceptuales.

Parámetros		UNIDADES
C	Parámetro adimensional	-
Bi	Parámetro adimensional	-
Wo	Índice de área foliar de la vegetación	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Siwp	Contenido de humedad correspondiente al punto de marchitez	mm
Ai	Caudal de referencia	mm
Sifc	Contenido de humedad correspondiente a la capacidad de campo	mm
Simax	Máximo contenido de humedad del estrato superior	mm
Ki	Coeficiente de descarga	hr <sup>-1</sup>
Kx	Factor de área que representa la cantidad o densidad de suelos orgánicos en la micro-cuenca	%

**Leyenda:** i, correspondiente al número de reservorio en la estructura del modelo.



## 3.3.1 Eficiencias de los modelos

La evaluación del comportamiento y rendimiento de los modelo se realizó a través de comparaciones entre el caudal observado y simulado, mediante el coeficiente de eficiencia de NSE (Nash & Sutcliffe, 1970). Adicionalmente se valoró la precisión (AC%), el sesgo (BIAS) y la modificación del coeficiente de Nash-Sutcliffe en transformación logarítmica (log NSE), que reduce la sensibilidad a valores extremos de la eficiencia de NSE para ofrecer un incremento en la sensibilidad del modelo para caudales bajos y altos (Krause & Boyle, 2005). Según (Wagener & Wheeler, 2006) el uso de varias funciones objetivo brindan una mejor identificabilidad de parámetros. Para la evaluación del rendimiento se toma subjetivamente los valores de las funciones objetivo mayor a 0.5

### 3.3.1.1 Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Esta puede ser considerada como una función objetivo el cual es una medida de bondad de ajuste. El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en la Hidrología. Mide la variabilidad de las observaciones, si la simulación es perfecta  $NSE=1$  (Cabrera, 2008); el coeficiente de Nash-Sutcliffe está representada como:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - Q_{s_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - \bar{Q})^2}$$

### 3.3.1.2 Sesgo Relativo BIAS

Mientras menor el porcentaje de BIAS sea, mejor será la correspondencia entre los datos observados y simulados. Un BIAS positivo indica sobre estimación y un BIAS negativo indica sub-estimación de caudales (Cambio-Global et al., 2009). Indica la tendencia promedio de los datos simulados de ser mayores o menores que los datos observados (Ovando, 2010).

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s_i} - Q_{o_i})}{n}$$

Como función objetivo se utilizó una combinación del coeficiente de Nash and Sutcliffe y el sesgo relativo BIAS (Kim & Lee, 2013)), dando como resultado:



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

$$F1 = NSE - 5|\ln(1 + BIAS)|2.5$$

## 3.3.1.3 Coeficiente de Nash-Sutcliffe modificado

Suele utilizarse cuando los valores de las variables simuladas son demasiado grandes (Cabrera, 2008), es decir, para disminuir el problema de las diferencias cuadráticas y la sensibilidad resultante en valores extremos por el NSE se calculó el coeficiente de Nash-Sutcliffe, empleando valores logarítmicos del caudal observado y del caudal simulado, como resultado la influencia de caudales bajos incrementa los errores y hace más sensible a la medida del criterio estadístico (Beven & Binley, 1992).

$$F2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{oi}) - \log(Q_{si}))^2}{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{oi}) - (\log \bar{Q}))^2}$$

## 3.3.1.4 Precisión (AC%)

Utilizado para establecer el porcentaje de datos dentro de las bandas de incertidumbre creadas con sus juegos de parámetros y simulaciones aceptables, se analiza la diferencia entre los límites superiores e inferiores de las mismas.

## 3.3.1.5 Bandas de Incertidumbre

Algunas de las fuentes de incertidumbre en modelación hidrológica están relacionadas con los errores de datos de entrada, la incapacidad para obtener los valores exactos de los parámetros y la representación estructural del modelo (Renard, Kavetski, Kuczera, Thyer, & Franks, 2010), (Beven & Binley, 1992).

Para la generación de las bandas de incertidumbre se utilizó la metodología GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) propuesta por Beven & Binley (1992). El supuesto básico de GLUE establece que no existe un conjunto único de parámetros para una serie de datos dada, de esta manera, se toman en cuenta todos los conjuntos de parámetros que brindan simulaciones denominadas aceptables. La metodología hace uso de un proceso de simulaciones Monte Carlo, el cual permiten investigar la indentificabilidad de los parámetros, es decir, genera una cantidad de



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

conjuntos de parámetros escogidos aleatoriamente de un rango impuesto, en los cuales se obtuvieron las simulaciones “aceptables”.

Los límites de comportamiento aceptado se establecieron en el 90% para todos los datos, de este modo, todas las simulaciones realizadas fueron comparadas con las respectivas bandas de incertidumbre de cada modelo en un intervalo de confianza del 90%. Según (Buytaert & Beven, 2011), una banda de incertidumbre estrecha que enmarque las observaciones revela una buena representación del sistema

## 3.4 Medidas de evaluación de los modelos conceptuales

La evaluación de los modelos conceptuales se efectuó mediante un análisis cuantitativo y cualitativo, de esta forma se aceptaron como modelos bien definidos aquellos que superaron las siguientes medidas de evaluación cuantitativa durante el periodo de validación:

- F1 mayor a 0.7
- F2 mayor a 0.5
- Porcentaje de datos dentro de la banda de incertidumbre, (AC) mayor a 60%.

La evaluación cualitativa para los dos modelos se basó en el análisis visual de la respuesta sistemática para sobre o sub-predicción del caudal (Krause & Boyle, 2005), analizando los límites de incertidumbre. La anchura de aquellos límites es útil para comparar la calidad de los dos modelos; además para indicar una buena representación del sistema, se enfoca en el porcentaje de observaciones dentro de la banda de incertidumbre así como la estrechez de la misma (Buytaert & Beven, 2011).

## 3.5 Relaciones entre las propiedades biofísicas y los conjuntos de parámetros

Gran parte de las características físicas de una cuenca se ven influenciados por la acción del agua, por esta razón se especula una relación fuerte entre las variables que describen la hidrología y las propiedades biofísicas de la misma (José et al., 2003). Además según Kokkonen, Jakeman, Young, Koivusalo, (2003), las propiedades de la captación deben caracterizar de buena manera los factores que generan la respuesta hidrológica de una cuenca.

### 3.5.1 Correlaciones múltiples

Esta técnica estadística sirve para verificar la existencia o no de la relación entre variables, donde involucra varias variables independientes con una dependiente. Ya



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

que la relación nunca es perfecta, es importante cuantificar el grado de relación mediante el coeficiente de correlación Pearson.

El coeficiente de correlación es una medida que indican la situación relativa de los mismos sucesos respecto a las dos variables, es decir, son la expresión numérica que nos indica el grado de relación existente entre las 2 variables y en qué medida se relacionan (Viles, 2004). La expresión que permite el cálculo es:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Donde:

$\sigma_{xy}$  es la covarianza de (X,Y)

$\sigma_x$  es la desviación típica de la variable X

$\sigma_y$  es la desviación típica de la variable Y

Si  $r = 1$  existe asociación perfecta positiva y la relación entre ambas variables es exacta y positiva, al aumentar una aumenta la otra y al disminuir una disminuye la otra.

Si  $r = -1$  existe asociación perfecta negativa y la relación entre ambas variables es exacta y negativa, al aumentar una la otra disminuye y viceversa.

Si  $r = 0$  las variables no están asociadas siendo imposible encontrar una relación funcional entre ellas.

Con los conjuntos de parámetros optimizados en el proceso de calibración y las diferentes propiedades biofísicas, se realizan correlaciones múltiples en orden de determinar cuáles presentan influencia o correlación significativa estadísticamente sobre cada uno de los parámetros del modelo, utilizando una matriz de correlaciones y el uso de la herramienta XLSTAT de Microsoft Excel. Para esta consideración los valores coeficientes de correlación Pearson deben ser diferentes de 0 con un nivel de significación de 0.05, denominado alfa.

## 3.5.2 Regresiones lineales múltiples

Con el fin de obtener una mejor precisión aplicamos las leyes de regresión, este comprende el intento de desarrollar una línea recta o ecuación matemática lineal de mayor ajuste que describe la reacción de dos o más variables. Existe una sola variable dependiente pero hay dos o más de tipo independiente (Molinero, 2002).





# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Los valores de los parámetros obtenidos en calibración son las variables dependientes, y las propiedades biofísicas son las independientes en el análisis de regresión. El modelo de regresión lineal es de la forma:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$$

$y$  es la variable de respuesta (dependiente),  $a$  es el intercepto de la línea con el eje  $y$ ,  $b$  es la pendiente de la línea de regresión (constante),  $x$  es la variable de predicción (independiente).

Las variables independientes ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) las cuales muestran alta correlación (con la variable dependiente  $y$ ), son agregadas a la ecuación de predicción mediante el método de regresión Stepwise (Kokkonen et al., 2003).

Para conocer el porcentaje de ajuste del modelo de regresión Stepwise se obtiene el  $R^2$  ajustado, debido a que su valor no aumenta necesariamente al introducir una variable independiente al modelo como lo hace el  $R^2$ .



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## CAPITULO N° 4

### RESULTADOS

#### 4.1 Calibración y evaluación de los modelos.

En los análisis realizados durante el periodo de calibración y validación se reflejó una diferencia en los valores de F1 y F2 entre los dos modelos conceptuales para cada micro-cuenca. En donde se nota un mejor desempeño del modelo 2Rp en todas las micro-cuencas durante el periodo de calibración y validación, sin embargo el modelo 3RSa muestra un mejor ajuste de los caudales bajos que se ve contrastado en la F2. Los indicadores del rendimiento se presentan en la tabla 3.

**Tabla 3.** Indicadores del rendimiento de los modelos para el periodo de calibración y validación para cada micro-cuenca.

M	2Rp			3RSa		
	F1	F2	AC%	F1	F2	AC%
M1	0.83 (0.77)	0.84 (0.60)	97 (75)	0.80 (0.70)	0.82 (0.70)	96 (78)
M2	0.86 (0.77)	0.83 (0.77)	91 (56)	0.84 (0.84)	0.78 (0.64)	95 (54)
M3	0.86 (0.82)	0.58 (0.56)	81 (61)	0.85 (0.78)	0.59 (0.59)	81 (68)
M4	0.89 (0.87)	0.52 (0.73)	88 (76)	0.86 (0.79)	0.78 (0.62)	95 (78)
M5	0.85 (0.80)	0.69 (0.68)	79 (63)	0.86 (0.78)	0.82 (0.67)	76 (65)
M7	0.83 (0.73)	0.80 (0.44)	97 (57)	0.81 (0.71)	0.76 (0.49)	92 (65)
M9	0.90 (0.89)	0.81 (0.81)	99 (62)	0.89 (0.87)	0.87 (0.64)	95 (61)
M10	0.88 (0.85)	0.86 (0.79)	99 (70)	0.83 (0.82)	0.73 (0.79)	89 (60)

**Leyenda:** Valores entre paréntesis ( ) corresponden al periodo de validación; F1, F2; AC%, precisión (% observaciones dentro de los límites de predicción).

Los indicadores de rendimiento con valores más significativos se obtuvieron en la micro-cuenca 9 la cual es cierre del conjunto de micro-cuencas; para el modelo 2Rp se tuvo 0.90 en F1 y 0.81 en F2 durante el periodo de calibración y en el periodo de validación obteniendo en F1 0.89 y en F2 0.81. Mientras que en el modelo 3RSa consiguió eficiencias de 0.89 en F1 y 0.87 en F2 en el periodo de calibración, mientras que en el periodo de validación se obtuvo valores de 0.87 en F1 y 0.64 en F2, representando así una aceptable simulación del caudal de la micro-cuenca.



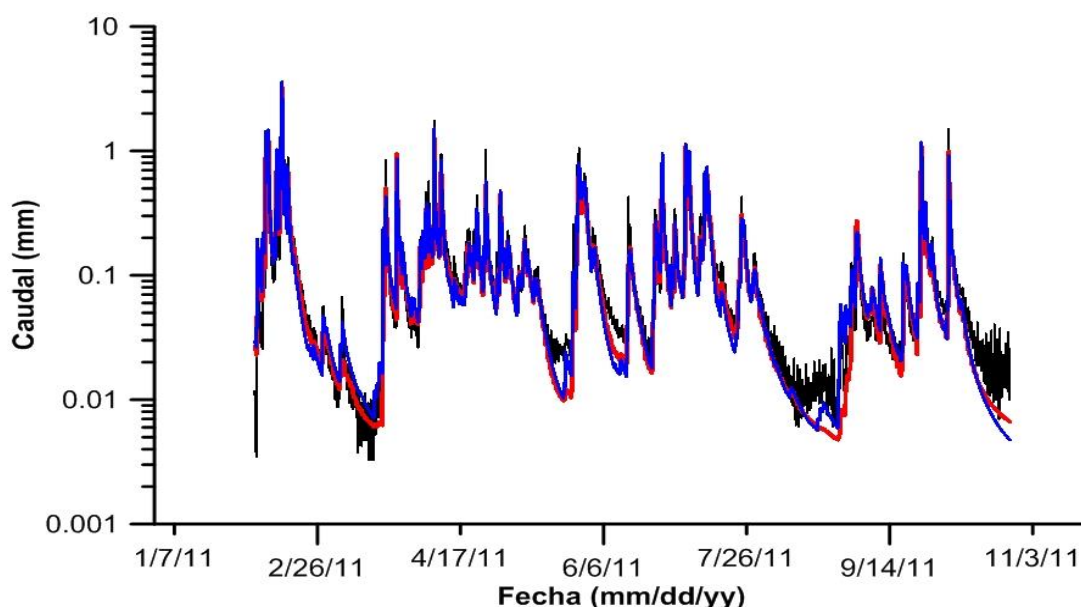
## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Los indicadores de rendimiento con valores menos significativos se presenta en las micro-cuencas 7 y 3. Para el modelo 2Rp en la micro-cuenca 7 tenemos valores en F1 de 0.83 y F2 de 0.80 en calibración y en el periodo de validación en F1 y F2 con 0.73 y 0.44 respectivamente, .Mientras en el modelo 3RSa se tiene valores en F1 de 0.81 y en F2 de 0.76 en el periodo de calibración, mientras que durante el periodo de validación se obtuvo 0.71 en F1 y 0.49 en F2.

Para el modelo 2Rp de la micro-cuenca 3, en el periodo de calibración se obtienen valores de 0.86 en F1 y 0.58 en F2, para el periodo de validación de 0.82 en F1 y 0.56 en F2. Mientras que en el modelo 3RSa durante el periodo de calibración se tiene valores de 0.85 en F1 y 0.59 en F2, en cambio en el periodo de validación muestra valores más bajos de 0.78 en F1 y 0.59 en F2. De esta manera se reflejo que los indicadores de rendimiento muestran para los dos modelos una representación aceptable en la simulación del caudal durante condiciones húmedas y secas. La figura 5 y 6 presenta la simulación de la micro-cuenca 9 en el periodo de calibración y validación respectivamente.

Los indicadores de rendimiento con bajos valores se pudieron haber obtenido debido a la calidad de datos de entrada principalmente en la precipitación, debido a la alta variabilidad espacial que muestra la zona de estudio (Rolando Céleri & Feyen, 2009).

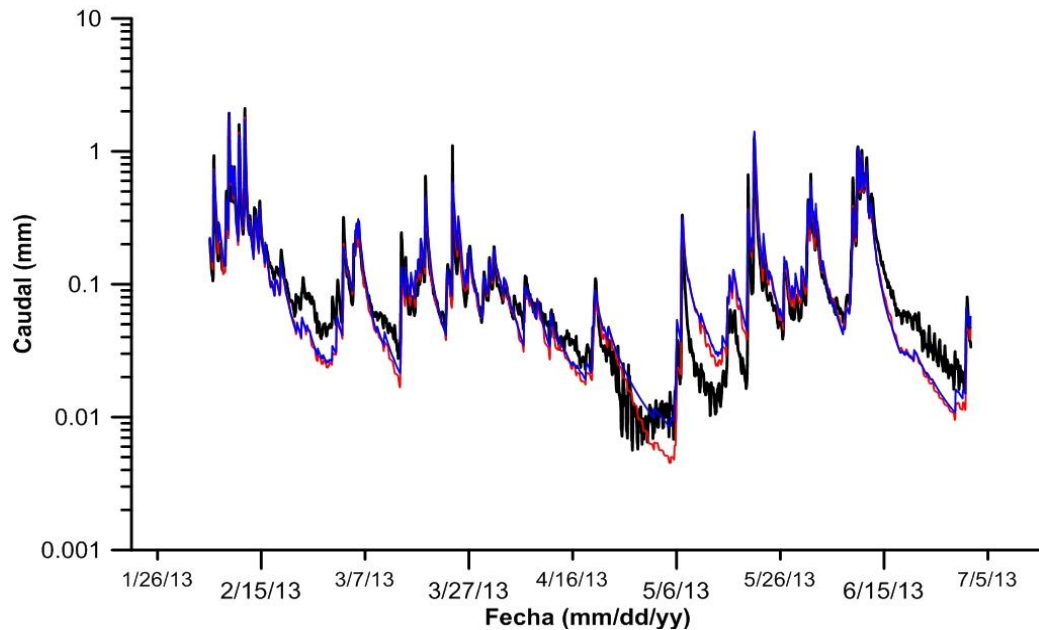


**Fig. 5** Descarga observada, descarga simulada del modelo 1 y descarga simulada del modelo 2 de la micro-cuenca 9 en el periodo de calibración.



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

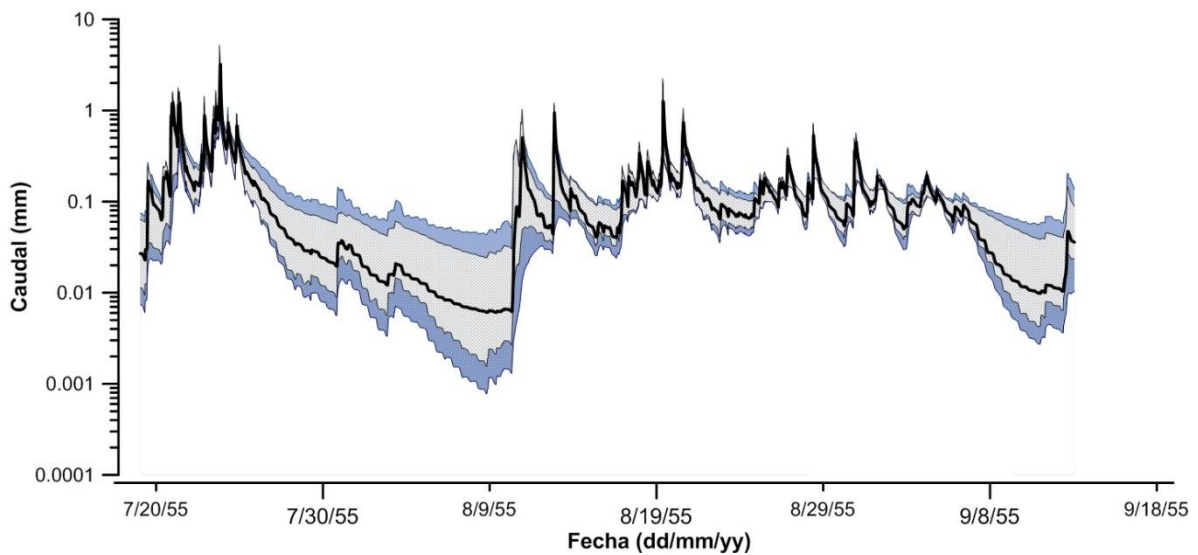


**Fig. 6** Descarga observada, descarga simulada del modelo 1 y descarga simulada del modelo 2 de la micro-cuenca 9 en el periodo de validación.

**Leyenda: Fig5 y Fig6** Caudal observado (---), caudal simulado 2Rp (---), caudal simulado 3RSa (---)

Para seleccionar que modelo está mejor definido para el sistema en estudio en cada micro-cuenca se utilizó las bandas de incertidumbre, en la cual se realizó una comparación entre la estrechez de las bandas de incertidumbre generadas con un intervalo de confianza del 90% en la descarga simulada, además se tomó en cuenta la cantidad de datos dentro de la banda y la comparación de las eficiencias entre el periodo de calibración y validación (tabla 3).

El procedimiento de calibración empleado en este proyecto, permitió establecer los mejores grupos de parámetros para representar el comportamiento del modelo y así mismo, establecer las bandas de incertidumbre. En la fig. 7 encontramos el ejemplo de las bandas de incertidumbre generadas de los dos modelos en el periodo de calibración, la figura hace referencia a la micro-cuenca 9.



**Fig. 7** Descarga observada y límites de incertidumbre del 5 y 95% de la descarga simulada de la micro-cuenca 9 en el periodo de calibración

**Leyenda:** Caudal observado (—), banda de incertidumbre del modelo 3RSa (■), banda de incertidumbre del modelo 2Rp (■).

Se realizó un análisis visual en cada banda de incertidumbre de los modelos en función de la estrechez con cada micro-cuenca y se encontró que para el periodo de calibración, en la M1, M2, M3, M4, M7, M9 y M10 el modelo con la banda más estrecha es el 2Rp presentando un porcentaje de datos dentro de las bandas de incertidumbre (AC%) mayores a 79%, mientras que para la M5 el modelo 3RSa tiene mejor banda de incertidumbre con porcentaje de datos dentro de la banda de incertidumbre de 76%.

De igual manera realizado el mismo análisis, para el periodo de validación se encontró que para la M1, M2, M3, M4, M9 y M10 la banda con mas estrechez presenta el modelo 2Rp mostrando un porcentaje de datos dentro de las bandas de incertidumbre (AC%) mayores a 56% mientras que para la M5 y M7 el modelo 3RSa posee la banda más estrecha en comparación con el otro modelo con un porcentaje de datos dentro de las bandas de incertidumbre (AC%) igual a 65%.

Realizado los análisis para definir qué modelo es el mejor para cada micro- cuenca finalmente tenemos que para la M1, M2, M3, M4, M7, M9 y M10 el modelo mejor definido es el 2Rp y para la M5 el modelo con buena definición es el 3RSa.

Sin embargo se podría establecer que cualquiera de los dos modelos muestran un rendimiento suficiente y una incertidumbre aceptable, y más bien su aplicación está en función, únicamente de la respuesta lluvia-caudal en 2Rp o el entendimiento más



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

profundo de los principales procesos hidrológicos conceptualizados del suelo en la estructura 3RSa (Albuja & Tenelanda, 2014).

## 4.2 Parámetros óptimos de los modelos

Durante el periodo de calibración se obtuvieron los parámetros optimizados para los modelos 2Rp y 3RSa, estos valores de cada parámetro se encuentran en la tabla 4 y 5.

**Tabla 4.** Parámetros óptimos del modelo 2Rp

M.C	D	Wo	a1	B1	K1	a2	B2	S1fc	S1wp	S1max	S2max
1	0.52	3.14	2.55	0.29	10.84	2.54	0.10	281.13	247.15	293.79	296.14
2	0.50	4.33	2.29	0.23	12.38	0.86	0.10	278.17	241.01	293.93	302.08
3	0.51	1.53	2.39	0.26	21.34	1.45	0.16	219.52	186.65	233.62	127.14
4	0.51	1.51	2.58	0.23	28.47	2.00	0.13	266.62	193.32	282.97	164.85
5	0.47	3.16	2.45	0.15	23.69	1.33	1.83	219.17	88.91	241.42	162.09
7	0.47	0.69	1.93	0.23	21.45	1.96	0.20	239.50	55.25	253.16	175.95
9	0.53	2.49	3.65	0.19	51.19	1.21	0.24	229.06	111.07	249.06	180.88
10	0.53	1.75	3.15	0.24	15.40	2.88	0.19	314.04	211.76	328.39	176.77



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

**Tabla 5.** Parámetros óptimos del modelo 3RSa.

M.C	B	Wo	S1wp	a1	B1	a2	B2	a3	B3	S1fc	S3fc	S3wp	S1max	K1	S2max	S3max	Kx	K3
1	0.5	3.1	116.1	2.8	0.2	1.0	0.1	0.7	2.3	228.2	184.6	160.7	256	56.9	238.1	187.2	0.8	755.2
2	0.5	2.7	258.6	2.5	0.4	1.4	0.1	1.1	1.8	278.2	262.4	206.7	303	51.0	226.2	263.9	0.8	364.8
3	0.5	1.5	60.7	2.8	0.3	2.8	0.3	1.5	1.8	206.7	230.8	224.5	238.6	165.9	266.7	236.0	0.8	170.8
4	0.5	1.2	152.1	2.1	0.1	2.5	0.0	2.2	0.9	258.8	247.0	12.7	285.2	89.7	257.3	274.4	0.8	289.2
5	0.5	3.0	20.4	2.0	0.7	1.4	1.3	1.4	0.4	26.2	240.0	219.8	238.5	9.2	334.6	287.0	0.4	365.8
7	0.5	0.7	85.1	2.6	0.2	2.1	0.9	0.9	0.9	192.7	179.8	67.6	215	184.7	228.6	181.7	0.7	449.3
9	0.5	3.9	121.6	2.8	0.3	1.5	0.6	3.4	0.6	313.0	267.1	259.4	319.5	120.4	206.5	268.7	0.7	214.2
10	0.5	1.7	136.8	2.0	0.2	1.8	0.9	3.0	1.0	151.8	274.6	120.0	186.8	270.0	262.5	284.2	0.8	230.9



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

En los valores de los parámetros óptimos del modelo 2Rp podemos observar que los parámetros  $C$ ,  $B1$ , y  $B2$  presentan valores similares entre las micro-cuencas, mientras que los valores de los parámetros restantes muestran una ligera aproximación entre ellos.

En el modelo 2Rp, los parámetros utilizados en la ecuación de evapotranspiración ( $C$  y  $Wo$ ), muestran los siguientes resultados: el índice de cobertura vegetal ( $Wo$ ) varía entre 0.7 - 4.3, comparables a los resultados obtenidos de este valor en páramos venezolanos, descritos por Rodríguez, Schwarzkopf, Gámez, Dugarte, & Dulhoste, (2011). Para el coeficiente adimensional  $C$  se obtuvieron valores entre 0.46 – 0.53 válidos en el rango de aplicación para estimación de la evapotranspiración potencial (Novák & Havrila, 2005).

Analizando el modelo 3RSa los parámetros  $C$ ,  $a1$ , y  $B1$  correspondientes a la ecuación de transferencia para flujo horizontal, también tienen valores similares entre las micro-cuencas, al igual que en el modelo 2Rp.

Los parámetros óptimos más importantes para los dos modelos en comparación, son los relacionados al almacenamiento de agua de los suelos del páramo ( $Simax$ ,  $Siwp$  y  $Sifc$ ), en donde se obtuvo valores de saturación, capacidad de campo y punto de marchites semejantes a la media de cada estrato obtenidos en campo (Crespo et al., 2012), (Aucapiña & Marín, 2014). Los cuales contrastan el buen desempeño que tiene los modelos para su aplicación en cuencas alto andinas

## 4.3 Obtención de las Ecuaciones de regresión

Los coeficientes de correlación entre los parámetros de los modelos con cada una de las propiedades biofísicas se observa en la tabla 6 y 7, estas tablas muestran un resumen de los parámetros que tienen una correlación significativa para cada modelo respectivamente.





# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

**Tabla 6.** Parámetros del modelo 2RP y sus valores de correlación (r). (Predictores)

Parámetros	A	Alt.Avg	P	Ds.d	TWI	S.AN	S.HS	VC.TG	VC.CP	G.Qm	G.Tu
<b>B</b>	0.128	-0.214	0.380	0.499	0.555	0.652	-0.638	0.640	-0.679	-0.109	-0.008
<b>Wo</b>	-0.187	0.396	0.001	0.077	0.302	-0.101	0.141	-0.031	0.124	0.574	-0.673
a1	0.615	-0.651	-0.034	-0.180	<b>0.812</b>	0.019	-0.016	-0.004	-0.072	-0.044	-0.003
B1	-0.451	0.383	0.350	<b>0.786</b>	-0.355	<b>0.843</b>	<b>-0.834</b>	<b>0.814</b>	<b>-0.786</b>	-0.016	0.033
K1	<b>0.862</b>	<b>-0.920</b>	-0.176	-0.391	0.695	-0.249	0.210	-0.277	0.195	-0.412	0.537
<b>a2</b>	-0.235	0.174	-0.126	0.220	-0.326	0.280	-0.262	0.246	-0.270	0.168	-0.151
B2	-0.039	0.131	<b>-0.738</b>	<b>-0.837</b>	-0.179	<b>-0.975</b>	<b>0.983</b>	<b>-0.963</b>	<b>0.985</b>	0.581	-0.347
<b>S1fc</b>	-0.354	0.389	0.434	0.587	0.080	0.525	-0.482	0.572	-0.552	0.093	-0.448
S1wp	-0.594	0.549	0.435	<b>0.751</b>	0.095	0.634	-0.601	0.679	-0.628	0.197	-0.277
<b>S1max</b>	-0.329	0.371	0.406	0.540	0.131	0.466	-0.422	0.519	-0.499	0.117	-0.476
<b>S2max</b>	-0.238	0.473	0.227	0.549	0.078	0.408	-0.367	0.466	-0.363	0.388	-0.608

*Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación  $\alpha=0,05$*

**Tabla 7.** Parámetros del modelo 3RSa y sus valores de correlación (r). (Predictores)

Parámetros	A	Alt.Avg	P	Ds.d	TWI	S.AN	S.HS	VC.TG	VC.CP	G.Qm	G.Tu
<b>B</b>	<b>0.749</b>	<b>-0.852</b>	-0.202	-0.343	0.489	-0.258	0.208	-0.285	0.206	-0.528	<b>0.733</b>
<b>Wo</b>	0.382	-0.203	-0.327	-0.244	0.576	-0.220	0.241	-0.213	0.244	0.522	-0.449
S1wp	-0.109	0.176	<b>0.785</b>	<b>0.731</b>	0.458	0.616	-0.593	0.701	-0.662	-0.294	-0.154
<b>a1</b>	0.288	-0.268	0.135	0.312	0.027	0.532	-0.553	0.465	-0.459	-0.154	0.270
B1	-0.110	0.235	-0.523	<b>-0.745</b>	-0.123	<b>-0.833</b>	<b>0.852</b>	<b>-0.819</b>	<b>0.857</b>	0.635	-0.519
a2	-0.108	-0.196	0.307	0.107	-0.176	0.169	-0.213	0.140	-0.216	<b>-0.707</b>	<b>0.819</b>
B2	0.300	-0.225	-0.470	<b>-0.891</b>	-0.197	<b>-0.746</b>	<b>0.750</b>	<b>-0.788</b>	<b>0.741</b>	0.224	-0.285
a3	0.603	<b>-0.722</b>	0.125	-0.221	<b>0.768</b>	-0.032	0.023	-0.047	-0.059	-0.361	0.237
B3	-0.555	0.567	0.334	<b>0.736</b>	-0.319	<b>0.725</b>	-0.705	<b>0.720</b>	-0.650	0.208	-0.198
S1fc	0.336	-0.368	0.610	0.696	0.572	<b>0.762</b>	<b>-0.779</b>	<b>0.776</b>	<b>-0.787</b>	-0.574	0.418
S3fc	0.186	-0.258	0.355	-0.117	<b>0.738</b>	-0.102	0.113	-0.055	0.006	-0.194	-0.060
<b>S3wp</b>	0.284	-0.187	-0.128	-0.407	0.309	-0.225	0.234	-0.259	0.265	0.351	-0.319
<b>S1max</b>	0.339	-0.286	0.153	0.260	0.704	0.128	-0.141	0.183	-0.153	-0.183	0.233
<b>K1</b>	0.184	-0.333	0.431	0.061	-0.061	0.395	-0.403	0.328	-0.428	-0.505	0.220
S2max	-0.465	0.418	-0.598	-0.592	-0.427	<b>-0.771</b>	<b>0.780</b>	<b>-0.760</b>	<b>0.776</b>	0.539	-0.242
<b>S3max</b>	0.060	-0.134	0.054	-0.319	0.580	-0.419	0.429	-0.361	0.324	-0.013	-0.083
Kx	-0.144	0.065	0.699	<b>0.887</b>	0.090	<b>0.998</b>	<b>-0.996</b>	<b>0.988</b>	<b>-0.988</b>	-0.384	0.193
<b>K3</b>	-0.290	0.495	-0.356	0.280	-0.430	0.133	-0.107	0.142	-0.043	0.590	-0.461

*Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación  $\alpha=0,05$*

El parámetro B2 del modelo 2Rp muestra correlación con varias de las propiedades biofísicas. Como indica la tabla 6 tiene correlación con la P, Ds.d, S.AN, S.HS, VC.TG, y VC.CP y sus coeficientes de correlación siendo mayores a 0.73 sea una



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

correlación positiva o negativa. Los que indica por ejemplo que mientras menor sea la pendiente de la micro-cuenca mayor será el valor del parámetro B2 y viceversa.

Los parámetros que se correlacionaron con menor cantidad de propiedades biofísicas en el modelo 2Rp es el a1 y S1wp, teniendo un valor de  $r$  de 0.81 con el TWI y 0.75 con la DS.d respectivamente.

Mientras que para el modelo 3RSa el parámetro con correlación con varias propiedades biofísicas es el B1 y B2. Como indica la tabla 7 posee correlación con la DS.d, S.AN, S.HS, VC.TG, y VC.CP con coeficientes mayores a 0.74, positiva o negativa. En cambio el parámetro S3fc tuvo correlación con una sola propiedad biofísica, con el TWI con un coeficiente igual a 0.47. En este caso tenemos por ejemplo que el parámetro B2 mientras mayor sea su valor menor será la cantidad de suelo Andosol en el área de estudio.

En las tablas indicadas previamente los valores marcados con negro son los valores significativos estadísticamente, es decir, que los valores marcados son diferentes de 0 con un valor de significancia de 0.05.

Seguidamente se desarrolló las ecuaciones de ajuste para cada uno de los parámetros. Las ecuaciones de regresión se muestran en la tabla 8 y 9 de cada modelo respectivamente.

**Tabla 8.** Ecuaciones de regresión de los parámetros del modelo 2Rp.

ECUACIONES DE REGRESIÓN	R2 ajustado
$a1 = 0,774 + 0,162 * TWI$	0.60
$B1 = 0,128 - 3,989E-03 * P - 5,529E-03 * TWI + 3,168E-03 * S.AN$	0.94
$K1 = 1025,843 - 0,264 * Alt.Avg$	0.82
$B2 = -7,300 + 1,791E-03 * Alt.Avg + 3,602E-02 * VC.CP$	0.98
$S1wp = 52,505 + 24,441 * Ds.d$	0.50

**Tabla 9.** Ecuaciones de regresión de los parámetros del modelo 3RSa.

ECUACIONES DE REGRESIÓN	R2 ajustado
$B = 2,163 - 4,404E-04 * Alt.Avg$	0.68
$S1wp = -116,212 + 13,437 * P$	0.55
$B1 = 5,648E-02 + 1,009E-02 * VC.CP$	0.69
$a2 = 1,334 + 2,480E-02 * G.Tu$	0.61
$B2 = 1,447 - 0,196 * Ds.d$	0.76



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

$a3 = -1,518 + 0,289 * TWI$	0.52
$B3 = 0,178 + 0,221 * Ds.d$	0.46
$S1fc = 310,395 - 4,310 * VC.CP$	0.56
$S3fc = 123,011 + 9,917 * TWI$	0.47
$S2max = 2895,228 - 20,474 * A - 0,700 * Alt.Avg + 2,362 * S.HS$	0.95
$Kx = 6,882E-02 + 9,080E-03 * S.AN$	0.99

En el modelo 2Rp de los 11 parámetros 6 no tuvieron predictores, mientras que en el modelo 3RSa de los 18 parámetros 7 de igual manera no obtuvieron predictores.

En las ecuaciones de regresión obtenidas, cada una obtuvo un valor de R2 ajustado representando como el ajuste del modelo. Se ocupa el R2 ajustado debido a que este valor no aumenta necesariamente a medida que se añade una variable independiente al modelo, de esta manera queda ajustada con el número de observaciones y el número de variables independientes (Cristina & Lorenzo, 2005).

Realizado un análisis individual de correlación para los parámetros que no obtuvieron correlaciones significativas, se encontraron mejores coeficientes de Pearson, sin embargo los valores no superaron el umbral para ser aceptadas como correlación significativa, esto se puede deber a que ciertos valores de las propiedades biofísicas varían de una micro-cuenca a otra.

Este análisis individual puede ser de gran utilidad para estimar los parámetros que no obtuvieron una correlación suficiente para generar la ecuación de regresión, o podría calibrarse el modelo con los rangos de parámetros obtenidos en este estudio, para una cuenca no monitoreada. Además se observa que la mayoría de parámetros que no obtuvieron la ecuación de ajuste, son los referentes al suelo; el valor de estos parámetros se podría obtener en un estudio respecto a los niveles de humedad del suelo para la cuenca en aplicación.

Con las ecuaciones de regresión mostradas previamente para cada uno de los parámetros, se podrán realizar las estimaciones para conocer el valor de los mismos para predicciones del caudal mediante un modelo hidrológico en cuencas no monitoreadas.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo por objetivo relacionar las propiedades biofísicas de una cuenca alto-andina con los parámetros calibrados de dos modelos hidrológicos conceptuales de lluvia-escorrentía en la Cuenca Alto-andina del río Zhurucay, en Quimsacocha, perteneciente a un ecosistema páramo. Los modelos conceptuales fueron calibrados y validados al fin de obtener los parámetros óptimos para posteriormente relacionarlos con las propiedades biofísicas de cada micro-cuenca, de esta manera obtener ecuaciones de regresión lineal para adquirir dichos parámetros y utilizarlos para predicciones de caudal, mediante el uso de un modelo hidrológico en cuencas no monitoreadas.

Los modelos 2Rp y 3RSa calibrados y validados obtuvieron valores aceptables en los indicadores de rendimiento en las micro-cuencas bajo estudio, sin embargo la etapa de validación muestra valores en los índices de rendimiento por debajo del valor tomado subjetivamente, lo que se pudo deber a la incertidumbre en los datos de entrada en aquel periodo. En el estudio de Buytaert & Beven, (2009) basado en la regionalización en un ecosistema de páramo, los valores de los índices de rendimiento, difieren significativamente a los de este estudio, esta comparación contrasta que los modelos utilizados en este estudio muestran un buen desempeño, presentando valores en los índices de rendimientos aceptables por encima del 0.80 en calibración y de 0.70 en validación.

Analizando los modelos con cada micro-cuenca en orden de determinar qué modelo esta mejor definido para cada una, se tomó el enfoque comparativo de la estrechez de las bandas de incertidumbre, la cantidad de datos dentro la banda y de los índices de rendimiento, se puede concluir que el mejor modelo para las micro-cuencas es el 2Rp en excepción de la C5 donde el modelo mejor definido es el 3RSa. En concordancia con el estudio de Crespo et al., (2012) realizado en el mismo ecosistema páramo, menciona que el intervalo de incertidumbre es más amplio durante los flujos bajos que en los flujos altos, lo que ocurre en todos los casos con cada micro-cuenca.

Cabe mencionar que el estudio realizado por (Xu, 2000) señala que cuando el número de parámetros es menor dentro de un modelo aumenta el contenido de información por parámetro y por lo tanto permite una determinación más precisa del parámetro y una correlación fiable de los valores obtenidos con las propiedades biofísicas del área de estudio. De igual manera en el estudio de (Servat & Dezetter, 1993) relacionaron los parámetros de dos modelos de lluvia-escorrentía con las características de las cuencas en ecosistemas andinos. El uno modelo tiene siete parámetros y el otro tiene tres parámetros y obtuvo que mejores resultados tenía el modelo de tres parámetros que para el de siete parámetros. Lo que corrobora lo mencionado anteriormente y por ende la investigación presentada.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Realizando las comparaciones entre el caudal observado y las simulaciones, se observa que en los flujos bajos no fueron simulados adecuadamente, sin embargo muestran una buena representación del caudal en picos. Modelaciones realizadas en el ecosistema páramo contrastan lo mencionado previamente, debido a que los estudios anteriores presentó un ajuste débil en los flujos bajos (Crespo, 2012) , (Vásquez, 2010).

Se analizaron estadísticamente la relación que existe entre los parámetros óptimos de los dos modelo con las propiedades biofísicas de cada micro-cuenca, y se tiene que para el modelo 2Rp de los 11 parámetros 6 no obtuvieron ecuaciones de regresión y del modelo 3RSa de los 18 parámetros 7 no adquirieron ecuaciones, debido a que no alcanzaron un valor significativo estadísticamente para luego obtener la ecuación de ajuste.

En un estudio de Mosquera, Lazo, Céleri, Wilcox, & Crespo, (2015) donde realizaron correlaciones de las propiedades biofísicas y los datos de respuesta hidrológica en la cuenca del río Zhurucay, los autores encontraron que el coeficiente de escorrentía tiene una buena correlación con el tipo de suelo y vegetación, en comparación con el presente estudio se encontró de igual manera que las propiedades del suelo y la vegetación obtuvieron afinidad con los parámetros utilizados en la ecuación de flujo horizontal, con la humedad del suelo. Lo que corrobora el estudio realizado, debido a que la escorrentía del paramo está altamente controlada por los suelos (Mosquera et al., 2012, 2014).

Sin embargo existen estudios de Xu, (2000), Deckers, Booij, Rientjes, & Krol, (2010), Kokkonen et al., (2003) con el mismo enfoque pero fueron realizados en distintos ecosistemas, lo que dificulta realizar un análisis comparativo entre los resultados. Debido a que existen pocos estudios dentro del ecosistema de páramo en el Ecuador, es complicado comparar ampliamente los hallazgos en el presente estudio con los de otros autores, sin embargo este estudio muestra resultados prometedores los cuales motivan a la investigación y utilización de varias metodologías para entender principalmente el funcionamiento del ecosistema de Páramo, además de buscar reconstruir las series de caudal de estas cuencas que son utilizadas como fuente del recurso hídrico en todo el país.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

## RECOMENDACIONES

En el ámbito de la investigación, es importante continuar o reforzar los resultados encontrados de este estudio mediante enfoques similares, siguiendo las metodologías de regionalización de parámetros mediante la calibración múltiple en cuencas de características similares (Kokkonen et al., 2003).

Los modelos conceptuales 2Rp y 3RSa demuestran una buena representación de los ecosistemas de páramo andino, la cual incita a su aplicación en cuencas no monitoreadas para obtener estimaciones de caudal, los mismos que tendrán fiabilidad para estudios medio ambientales.

Como investigación futura se debería considerar transferir la información obtenida en este estudio (ecuaciones de regresión para los parámetros de un modelo hidrológico) a otras cuencas de Páramo, para comparación de resultados entre datos observados de la cuenca y datos estimados por esta metodología, de esta manera obtener una cuantificación del error de estimación del caudal.



## BIBLIOGRAFÍA

- Adopt-a-stream, G. (2003). *Introducción a cuencas hidrológicas* (Vol. 319).
- Albuja, E., & Tenelanda, D. (2014). Desarrollo de un modelo conceptual de lluvia-escorrentía para interpretación de procesos hidrológicos en la cuenca Altoandina del río Zhurucay.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo.
- Aucapiña, G., & Marín, F. (2014). *Efectos de la posición fisiográfica en las propiedades hidrofísicas de los suelos de páramo de la microcuenca del río Zhurucay*.
- Bahamondes, R., & Gaete, N. (2000). *Manejo de cuencas hidrográficas*.
- Beven, & Binley. (1992). The Generalized Likelihood Uncertainty Estimation methodology.
- Bloschl, G., & Sivapalan, M. (1995). Scale issues in hydrological modelling : a review, 9(September 1994), 251–290.
- Borja, P., Iñiguez, V., Crespo, P., Cisneros, P., & Cisneros, F. (2008). Características Físico-Químicas de Histosoles y Andosoles de los Páramos de Quimsacocha, Ecuador., 29–31.
- Buytaert, W., & Beven, K. (2009). Regionalization as a learning process. *Water Resources Research*, 45(11), n/a–n/a. <http://doi.org/10.1029/2008WR007359>
- Buytaert, W., & Beven, K. (2011). Models as multiple working hypotheses: hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrological Processes*, 25(11). <http://doi.org/10.1002/hyp.7936>
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 413–421. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- Cabrera, J. (2008). *Calibración de Modelos Hidrológicos* (Vol. 1).
- Cambio-Global, C., Católica-de-Chile, U., & U.Cuenca, U. (2009). *Guía metodológica-modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP*. Santiago, Boston.
- Céleri, R., Crespo, P., Bièvre, B. De, & Acosta, L. (2011). Una iniciativa regional de monitoreo hidrológico de ecosistemas andinos. Retrieved April 29, 2015, from





# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

[https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=es&user=9Kn\\_GOUAAAAJ&citation\\_for\\_view=9Kn\\_GOUAAAAJ:ULOm3\\_A8WrAC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=9Kn_GOUAAAAJ&citation_for_view=9Kn_GOUAAAAJ:ULOm3_A8WrAC)

Célleri, R., & Feyen, J. (2009). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems : Importance , Knowledge Status , and Perspectives, 29(4).

Cordova, M., Carrillo, G., & Célleri, R. (2013). Errores en la estimación de la evapotranspiración de referencia de una zona de páramo andino debidos al uso de datos mensuales, diarios y horarios., 5, 14–22.

Crespo, P. (2012). *Analysis of the rainfall runoff processes of Andean ecosystems in ern Ecuador : using hydrometric hydrometric , tracers and modeling approaches.*

Crespo, P., Bücker, A., Feyen, J., Vaché, K. B., Frede, H.-G., & Breuer, L. (2011). Preliminary evaluation of the runoff processes in a remote montane cloud forest basin using Mixing Model Analysis and Mean Transit Time. *Hydrological Processes*, 26(25), 3896–3910. <http://doi.org/10.1002/hyp.8382>

Crespo, P., Feyen, J., Buytaert, W., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H.-G., & Ramírez, M. (2011). Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 407, 164–174. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>

Crespo, P., Feyen, J., Buytaert, W., Célleri, R., Frede, H.-G., Ramírez, M., & Breuer, L. (2012). Development of a conceptual model of the hydrologic response of tropical Andean micro-catchments in Southern Ecuador. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(2), 2475–2510.

Cristina, E., & Lorenzo, S. (2005). *Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal.*

Deckers, D. L. E. H., Booij, M. J., Rientjes, T. H. M., & Krol, M. S. (2010). Catchment Variability and Parameter Estimation in Multi-Objective Regionalisation of a Rainfall–Runoff Model. *Water Resources Management*, 24(14), 3961–3985. <http://doi.org/10.1007/s11269-010-9642-8>

Fernandez, A., & Gonzalo, O. (2012). *Caracterización Morfométrica de la Cuenca Hidrológica Chinchao, Provincia Huanuco.* Universidad Nacional Agraria de laSelva.

García, W. (2011). El sistema complejo de la cuenca hidrológica, (Dourojeanni 1994).

Guallpa, M. (2013). *Efecto de la incertidumbre de las observaciones hidrometeorológicas en estudios hidrológicos (Zhurucay, Soldados y Mazar).*





# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

- J.Gaspari, F., M.Rodriguez, A., & E.Senisterra, G. (2012). Caracterización morfológica de la cuenca alta del río sauce grande, Buenos Aires, Argentina.
- José, O., Sánchez, M., Ignacio, J., Upegui, V., Diego, J., Osorio, G., & Quevedo, I. (2003). Regionalización de Características Medias de la Cuenca con Aplicación en la Estimación de Caudales Máximos, pp. 1–12.
- Josse, C., Mena, P. A., & Medina, G. (2000). *Páramo: La Biodiversidad de los Páramos*. Quito.
- Kim, H. S., & Lee, S. (2013). Assessment of the adequacy of the regional relationships between catchment attributes and catchment response dynamics, calibrated by a multi-objective approach. *Hydrological Processes*, 28(13), 4023–4041. <http://doi.org/10.1002/hyp.9942>
- Kokkonen, T. S., Jakeman, A. J., Young, P. C., & Koivusalo, H. J. (2003). Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina. *Hydrological Processes*, 17(11), 2219–2238. <http://doi.org/10.1002/hyp.1329>
- Krause, P., & Boyle, D. P. (2005). Advances in Geosciences Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment, 89–97.
- Maderey, L. (1998). Características físicas de la Cuenca de Río Tizar.
- Mazzilli, N., Guinot, V., & Jourde, H. (2012). Sensitivity analysis of conceptual model calibration to initialisation bias. Application to karst spring discharge models., 42, 1–16.
- Molinero, L. M. (2002). *Construcción de modelos de regresión multivariantes*.
- Mosquera, G., Lazo, P., Cárdenas, I., & Crespo, P. (2012). Identificación de las principales fuentes de agua que aportan a la generación de escorrentía en zonas Andinas de páramo húmedo : mediante el uso de los isótopos estables deuterio ( $\delta^2\text{H}$ ) y oxígeno- 18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ), 3(2), 87–105.
- Mosquera, G., Lazo, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Céleri, R. (2014). Delineation of the streamflow contributing components in a wet Andean páramo catchment combining hydrometric and isotopic data.
- Mosquera, G. M., Lazo, P. X., Céleri, R., Wilcox, B. P., & Crespo, P. (2015). Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *Catena*, 125, 120–128. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>
- Novák, V., & Havrila, J. (2005). Transpiration of Plants : A Review of Calculation Methods, 7.



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Obrocki, L., Goerres, M., & Kaslin, R. (2012). *Georeferenciación del Páramo de UNOPUCH*.

Ordoñez, J. (2011a). *¿ Qué es cuenca hidrológica ?*.

Ordoñez, J. (2011b). Ciclo Hidrológico. Retrieved November 13, 2014, from [http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm\\_Files/Publicaciones/Varios/Ciclo\\_Hidrologico.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Ciclo_Hidrologico.pdf)

Ortiz, D., Chiriboga, C., & Martínez, J. (2008). *Gente y Ambiente de Páramo : Realidades y Perspectivas en el Ecuador*. Proyecto Páramo Andino.

Ovando, A. (2010). *Potenciales impactos del cambio climático en el ciclo hidrológico de la cuenca del Río Comarapa*.

Padrón, R. (2013). *Análisis de la Estructura de la Lluvia del Páramo*.

Post, D. a., & Jakeman, A. J. (1999). Predicting the daily streamflow of ungauged catchments in S.E. Australia by regionalising the parameters of a lumped conceptual rainfall-runoff model. *Ecological Modelling*, 123(2-3), 91–104. [http://doi.org/10.1016/S0304-3800\(99\)00125-8](http://doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00125-8)

Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Céleri, R. (n.d.). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo : páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador., 42(2), 138–153.

Renard, B., Kavetski, D., Kuczera, G., Thyer, M., & Franks, S. W. (2010). Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors. *Water Resources Research*, 46(5), n/a–n/a. <http://doi.org/10.1029/2009WR008328>

Rodríguez, E., Schwarzkopf, T., Gámez, L. E., Dugarte, W., & Dulhoste, R. (2011). Canopy structure and woody species distribution at the upper treeline in the Venezuelan andes estructura del dosel y distribución de especies leñosas en el límite superior del bosque en los Andes Venezolanos, 24(1), 47–59.

S.C, P., Escolero, O., Dominguez, E., & Edda, S. (2003). Ciclo Hidrológico. Retrieved November 13, 2014, from [http://www2.inecc.gob.mx/emapas/download/lch\\_ciclo\\_hidrologico.pdf](http://www2.inecc.gob.mx/emapas/download/lch_ciclo_hidrologico.pdf)

Sanchez, J. (1974). *Modelos matematicos en Hidrología*. Bogota, Colombia.

Servat, E., & Dezetter, A. (1993). Rainfall-runoff modelling and water resources assessment in northwestern Ivory Coast. Tentative extension to ungauged



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

- catchments. *Journal of Hydrology*, 148(1-4), 231–248.  
[http://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90262-8](http://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90262-8)
- Soto-w, A., Llambí, L. D., Celleri, R., Ochoa, B., Borja, P., & Bievre, D. B. (2012). *Ecología , hidrología y suelos de páramos*.
- Thiessen, A. (1911). *Monthly Weather Review*, 39(10), 1082–1084.
- Tocachi, B. O. (2014). *Regionalización de indicadores hidrológicos para evaluar impactos de los cambios de uso de la tierra en los Andes Tropicales*.
- Vargas, A., & Monroy, J. C. (2011). Estudio del comportamiento de modelos hidrológicos bajo un análisis de sensibilidad e incertidumbre, 65–77. Retrieved from [www.redalyc.org](http://www.redalyc.org)
- Vásconez, P. M., & Hofstede, R. (2006). *Los páramos ecuatorianos*.
- Vásquez, R. (2010). Modelación hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano, 1(1), 79–90.
- Vázconez, P. M. (2010). *Los páramos ecuatorianos: Paisajes diversos, frágiles y estratégicos. 2010*.
- Vaze, J., Jordan, P., Beecham, R., & Frost, S., Summerell, G. (2012). Guidelines for rainfall-runoff modelling Towards best practice model application. *eWaterCRC*.
- Vélez Upegui, J. I. (2013). Hydrological distributed simulation strategy: a conceptual integration of hydrology, hydraulics and geomorphology. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 37(144), 393–409. Retrieved from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-39082013000300009&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082013000300009&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Viles, E. (2004). *Correlaciones. Guía de minitab 14*.
- Viramontes, O., Escoboza, L., Alvarez, C., Alvarez, A., REyes, V., Román, J., & Pérez, A. (2007). Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua, 1(3), 21–31.
- Wagener, T. (2003). Evaluation of catchment models. *Hydrological Processes*, 3378(June), 3375–3378. <http://doi.org/10.1002/hyp.5158>
- Wagener, T., & Wheeler, H. S. (2006). Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 132–154. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.015>



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

- Weber, J. F., Dasso, C. M., & Jorquera, E. (2010). Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta, *XXIX*, 15–18.
- Wooldridge, S., Kalma, J., & Kuczera, G. (2001). Parameterisation of a simple semi-distributed model for assessing the impact of land-use on hydrologic response. *Journal of Hydrology*, *254*, 16–32.
- Xu, C. (2000). Estimation of Parameters of a Conceptual Water Balance Model for Ungauged Catchments, 353–368.